VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
I. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТОПЛИВ.. 4
I.I. Химический состав 5
I.2. Теплота сгорания 9
I.3. Отношение топлив к нагреванию без доступа окислителя I0
2. ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ И ЦЕЛЬ ЕГО РАСЧЕТА II
2.I. Цель расчета процесса горения II
2.2. Ограничения и допущения принимаемые в технических расчетах горения топлива I4
3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВ I5
3.I. Определение объема кислорода для окисления горючих элементов топлива I5
3.2. Определение количества воздуха для сжигания I кг топлива I6
3.3. Определение выхода и состава продуктов сгорания. I7
3.4. Расчет температуры горения I9
4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА... 22
4.I. Расчет объема кислорода и воздуха для сжигания I м^3 газа 22
4.2. Расчет выхода продуктов сгорания 23
5. ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА 24
6. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ 25
6.I. Расчет характеристик горения смесей газообразных топлив 25
6.2. Расчет характеристик горения смесей газообразных и жидких топлив 26
7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ 27
7.I. Расчет горения жидкого топлива 27
7.2. Расчет процесса горения природного газа 3I
7.3. Расчет процесса горения коксодоменной смеси 36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 38
ПРИЛОЖЕНИЯ 39

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

66

662.6(075.8)

УДК 626.783:662.6/8

Авторы: С.Н.Гущин, М.Д.Казяев

РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ: Учебное пособие / С.Н.Гущин, М.Д.Казяев. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. 48 с.

Изложены краткие сведения об основных характеристиках топлив, рассмотрены теоретические основы процесса горения и его расчет на основе стехиометрических соотношений и по приближенным формулам. Приведены примеры расчетов процесса горения различных топлив.

Даны варианты химического состава различных топлив и условия их сжигания. Этими данными необходимо пользоваться при выполнении курсового домашнего задания.

Настоящее пособие предназначено для студентов металлургических специальностей очного, вечернего и заочного обучения.

Библиогр. 4 назв. Табл.2. Прил.5

Рецензент :
кафедра автоматизации и технологии литейных процессов Уральского государственного профессионально-педагогического университета (зав.кафедрой - проф. д-р техн.наук Б.С.Чуркин), академический советник Академии инженерных наук Российской Федерации канд.техн.наук А.М.Юрлов (Уралэнергочермет)

Библиотека
Уральского государственного
технического университета-УПИ

ISBN 5-230-17166-9 © ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2001

ВВЕДЕНИЕ

Тепловая энергия играет доминирующую роль в развитии человеческого общества. Ежегодное расходование этой энергии составляет огромную цифру - $12 \cdot 10^{16}$ кДж, и к тому же наблюдается устойчивая тенденция роста потребления теплоты.

Основная доля потребления тепловой энергии приходится на энергетику, далее - на промышленность и транспорт и, наконец, на бытовые нужды.

Источниками получения энергии являются прежде всего ископаемые топлива всех видов (95%), гидроэнергетика (около 4%) и атомная энергетика (немногим более 1%). Но природные источники топливной энергии небезграничны, поэтому одной из актуальных задач современного развития технического прогресса стала экономия топливно-энергетических ресурсов.

Другим важным моментом использования топлив в качестве тепловой энергии является охрана окружающей среды от вредного воздействия продуктов, образующихся при сжигании топлив.

В свете сказанного напрашивается основной вывод: для экономичного и экологически чистого использования топлива необходимо уметь правильно рассчитывать процесс горения и грамотно управлять им.

Основными потребителями твердого топлива являются промышленные котельные агрегаты теплоэнергетики, а также доменные печи черной металлургии и теплотехнические агрегаты цветной металлургии. Жидкое топливо в основном используется для сжигания под котлами средней и малой мощности, в плавильных и нагревательных печах черной и цветной металлургии и в различных двигателях транспортных устройств. Газообразное топливо, являясь самым прогрессивным видом топлива ввиду легкости транспортировки и регулирования расходования, широко используется в теплотехнических агрегатах металлургической, машиностроительной, химической, строительной и другой промышленности, а также в котельных и бытовых установках. В последнее время все большее применение газообразное топливо находит на транспорте.

Из сказанного очевидно, что промышленные и бытовые объекты располагают большим парком котельных, печных и других агре-

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

гатов и установок, работа которых зависит, прежде всего, от осуществляемого в них процесса сжигания топлива. И несмотря на то, что сам расчет процесса горения топлива в проектировании и эксплуатации тепловых агрегатов занимает незначительную долю, от него зависит решение многих теплотехнических задач: выбор конструкций топливосжигающих устройств, расчет топливо- и воздухопроводов, каналов для отвода продуктов сгорания, тягодутьевых устройств и теплоутилизационных установок.

Данное учебное пособие содержит краткие сведения о топливах, процессе горения и способах расчета этого процесса. Здесь также приведены все необходимые физические величины, без которых невозможен расчет процесса горения, представлены примеры расчетов горения различных топлив.

I. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТОПЛИВ

Любое ископаемое топливо может характеризоваться большим количеством свойств и параметров. Но к основным можно отнести следующие: химический состав, теплота сгорания и отношение к нагреванию без доступа окислителя.

Прежде чем остановиться на этих характеристиках, необходимо отметить, что все топлива, используемые в промышленности и быту, можно классифицировать по двум основным признакам: по происхождению и по агрегатному состоянию.

По происхождению топлива могут быть естественными и искусственными, а по агрегатному состоянию – твердыми, жидкими и газообразными. К естественным твердым топливам относят все виды углей, торф, горючие сланцы и в бытовых целях – дрова. Искусственными видами твердого топлива являются кокс, торфяные брикеты, угольная пыль.

Единственный естественный вид жидкого топлива – сырая нефть, но она в качестве сжигаемого топлива не применяется, так как из нее получают большое количество других видов жидкого топлива, являющихся уже искусственными: бензин, керосин, соляровые масла, мазут и смола.

Основным естественным газообразным топливом считаются природный и попутный газы, получившие в настоящее время самое широкое применение в промышленности и быту. К искусственным

www.mahp.ustu.ru

видам газообразного топлива относят газовые смеси, получаемые в результате технологических процессов. Так, в процессе коксования углей попутно получают коксовый газ. При производстве чугуна доменные печи вырабатывают большое количество газа, называемого доменным или колошниковым. В процессе добычи природного газа из него выделяют жидкие фракции пропан-бутановой смеси, которая закачивается в специальные емкости – хранилища, а затем транспортируется к потребителю в цистернах.

Существуют и другие виды жидких и газообразных топлив, но они не получили широкого распространения в промышленности и быту и поэтому здесь не упоминаются.

Теперь рассмотрим основные характеристики топлив.

I.I. Химический состав

Любое топливо можно рассматривать как вещество, состоящее из отдельных химических элементов, поэтому, говоря о химическом составе, часто применяют еще термин "элементарный состав". В действительности минеральное топливо состоит из различных химических соединений, от вида которых зависит его агрегатное состояние. Д.И.Менделеевым было отмечено, что твердые и жидкие топлива состоят из одних и тех же химических элементов, несмотря на то, что вид их химических соединений различный, что и предопределяет: одни топлива – твердые, другие – жидкие.

Состав газообразных топлив может быть самым различным, так как это механическая смесь газообразных веществ, не реагирующих друг с другом в исходном состоянии.

Химический состав твердого и жидкого топлив выражают в массовых процентах, а газообразного – в объемных процентах.

В общем виде состав твердых и жидких топлив записывают в виде знаков химических элементов или условными буквенными обозначениями. Так, в выражении

$$C+H+O+N+S+A+W = 100\%$$

символами C, H, O, N, S выражают процентное содержание (по массе) соответственно углерода, водорода, кислорода, азота и серы, а символы A и W – содержание золы и влаги. Отметим, что зола топлива содержит минеральные оксиды и соли типа SiO_2, Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3, $CaSO_4$ и т.д.

www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

Углерод – наиболее важная составляющая твердого и жидкого топлива, так как его больше всего содержится в массе топлива. Сгорая, углерод выделяет значительное количество теплоты.

В топливе углерод находится обычно в виде соединений с другими элементами, прежде всего с водородом. Эти соединения называют углеводородными.

Водород – вторая по важности горючая составляющая твердого и жидкого топлив. По количеству теплоты, выделяемой при горении, водород в 3,5 раза ценнее углерода, но содержание водорода в топливах значительно меньше, чем углерода. Водород в топливе может находиться в виде соединений с углеродом, серой, кислородом и в свободном состоянии.

Сера, содержащаяся в топливе, может находиться в виде горючих и негорючих соединений. Органическая (S_o) и колчеданная (FeS_2) сера горючая, а сульфатная ($CaSO_4$, $FeSO_4$ и т.д.) – не горючая и входит в состав золы топлива.

Азот топлива является балластом, относится к негорючей части топлива, но при горении в условиях высоких температур может вступать во взаимодействие со свободным кислородом, образуя оксиды азота (NO_x), переходящие в продукты сгорания и являющиеся веществами, оказывающими вредное воздействие на окружающую среду, особенно на живые организмы.

Кислород – нежелательная составляющая топлива. Находясь в свободном состоянии, кислород повышает способность топлива к самовозгоранию. Соединяясь с углеродом и водородом топлива, кислород образует негорючие составляющие $(CO_2,\ H_2O)$, снижающие тепловую ценность топлива.

Зола также является нежелательной составляющей топлива, снижающей долю горючей его части. К тому же при горении составляющие золы ошлаковываются и увлекают за собой несгоревшие частицы топлива, уменьшая общее количество выделяющейся теплоты. При большом количестве золы усложняются условия обслуживания топочного устройства.

Влага – весьма нежелательная составляющая топлива, поскольку не просто понижает содержание горючих компонентов, но и требует значительных затрат теплоты на испарение и перегрев. Влага в твердом и жидком топливах может быть в виде внешней, т.е. механически удерживаемой на поверхности топлива, а также

гигроскопической, остающейся в порах топлива. Кроме этого, влага в топливе может быть в виде соединения водорода с кислородом (пирогенетическая), а также может находиться в молекулах минеральных веществ золы топлива (гидратная).

В зависимости от химического анализа различают составы твердого и жидкого топлива: органическая масса (индекс "о" в верхней части химического элемента, например C^o), горючая масса (индекс "г") и рабочая масса (индекс "р").

При сжигании топлива приходится всегда иметь дело с полным, т.е. рабочим, составом топлива, поэтому он может быть записан в виде равенства

$$C^р+H^р+S^р+O^р+N^р+A^р+W^р = 100\%.$$

Если же приводится состав сухой массы топлива, то он записывается так:

$$C^с+H^с+S^с+O^с+N^с+A^с = 100\%.$$

Состав горючей массы выглядит следующим образом:

$$C^г+H^г+S^г+O^г+N^г = 100\%,$$

причем наличие в этой массе кислорода и азота не означает, что они горят, а просто они могут находиться в соединении с горючими составляющими.

Существуют формулы для пересчета состава топлива с одной массы на другую. Если условно обозначить любой химический элемент топлива буквой x, то при пересчете сухой массы топлива в рабочую следует пользоваться формулой (%):

$$x^р = x^с\,\frac{100-W^р}{100}, \qquad (1)$$

при пересчете горючей массы топлива в рабочую формула выглядит следующим образом:

$$x^р = x^г\,\frac{100-(A^р+W^р)}{100}, \qquad (2)$$

Как указывалось ранее, химический состав газообразного топлива непостоянен и зависит от места добычи или способа получения, поэтому различные виды газообразного топлива имеют

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

различное количество составляющих. В общем случае состав газообразного топлива может быть записан так:

$$H_2S + CO + H_2 + CH_4 + C_mH_n + CO_2 + O_2 + N_2 + \ldots = 100\%.$$

Здесь также различают горючие $(H_2S, CO, H_2, CH_4, C_mH_n)$ и негорючие (CO_2, O_2, N_2, H_2O) составляющие газообразного топлива.

В отличие от твердого и жидкого топлив у газообразного различают всего две массы: сухую и рабочую (влажную), которые обозначаются так:

$$CO^{c,г} + H_2^{c,г} + CH_4^{c,г} + CO_2^{c,г} + \ldots + N_2^{c,г} = 100\%;$$

$$CO^{в,г} + H_2^{в,г} + CH_4^{в,г} + CO_2^{в,г} + \ldots + N_2^{в,г} + H_2O^{в,г} = 100\%.$$

Влага в рабочем составе газообразного топлива находится в виде водяных паров. Содержание влаги зависит от его температуры. Обычно химический состав газообразного топлива приводится на сухую массу, а влажный (рабочий) состав рассчитывают так же, как для твердого и жидкого топлив. Но процентное содержание влаги (в объемных процентах) может быть получено только путем расчета, если известна величина массового влагосодержания (g), выраженная в граммах на один кубический метр сухого газа при нормальных условиях 0°С и давлении 760 мм рт.ст. (г/м³ с.г.). Ниже приведена таблица влагосодержания в газах в зависимости от температуры газа:

t, °С	0	5	10	20	30	40	50	60	70
g, г/м³ с.г	4,9	7,0	9,8	19,0	35,1	63,1	111,3	197,0	356,0

Зная влагосодержание газа g, г/м³ с.г, можно найти процентное содержание водяных паров в газообразном топливе по одной из формул:

$$H_2O^{в,г} = \frac{100}{\frac{803,6}{g} + 1} \ \% \qquad (3)$$

или

$$H_2O^{в,г} = \frac{0,1244\, g}{1 + 0,001244\, g} \ \%, \qquad (3а)$$

а затем пересчитать все составляющие топлива на влажную массу:

$$x^{в,г} = x^{c,г} \frac{100 - H_2O^{в,г}}{100} \ \%. \qquad (4)$$

Таким образом, химический состав топлива является исходной характеристикой, от которой зависит дальнейший расчет процесса горения.

Но сам химический состав еще не определяет тепловую ценность топлива. Об этом можно судить по другой характеристике, называемой теплотой сгорания топлива.

1.2. Теплота сгорания

При сжигании топлива в результате окисления горючих составляющих выделяется теплота и тем в большем количестве, чем больше сжигается топлива. Для сравнения между собой различных видов топлива по их тепловой ценности, а также для осуществления расчетов процесса горения применяют удельную тепловую характеристику, называемую теплотой сгорания.

Теплота сгорания топлива – это количество теплоты, которое выделяется при полном сжигании единицы топлива. В качестве единицы для твердого и жидкого топлива используют 1 кг, а для газообразного – 1 м³.

Теплота сгорания топлива обозначается буквой Q и имеет размерность килоджоуль на килограмм (кДж/кг) или килоджоуль на кубический метр (кДж/м³). При окислении таких горючих составляющих топлива, как H_2, CH_4, C_mH_n, H_2S, образуются водяные пары, на нагрев и перегрев которых требуется определенное количество теплоты. Вся выделившаяся в процессе горения теплота первоначально заключена в объеме продуктов сгорания. Если продукты горения в процессе теплоотдачи охлаждаются до температуры ниже 373 К, то находящиеся в них водяные пары конденсируются и выделяют дополнительное количество теплоты. При этом вся суммарная теплота, выделившаяся от сжигания единицы топлива, будет характеризоваться высшей теплотой сгорания рабочего топлива $(Q_в^р)$, являющейся физико-химической характеристикой.

В промышленных условиях при осуществлении высокотемпературных процессов продукты сгорания покидают рабочее прост-

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

ранство тепловых агрегатов с температурой, намного превышающей 373 К, поэтому образующиеся при горении водяные пары не конденсируются, а следовательно, и не выделяют дополнительной теплоты. В этом случае тепловая ценность топлива характеризуется низшей теплотой сгорания $(Q_н^р)$, являющейся рабочей характеристикой топлива.

Теплота сгорания топлива может быть определена экспериментально, для чего требуется специальная лабораторная аппаратура, а также может быть рассчитана по химическому составу топлива.

Для расчета низшей теплоты сгорания твердого и жидкого топлив пользуются формулой Д.И.Менделеева:

$$Q_н^р = 339C^р + 1030H^р - 109(O^р - S^р) - 25(9H^р + W^р) \text{ кДж/кг.} \quad (5)$$

Низшую теплоту сгорания газообразного топлива можно рассчитать, суммируя тепловые эффекты реакций окисления горючих компонентов топлива:

$$Q_н^р = 127{,}7CO^{в,г} + 108H_2^{в,г} + 358CH_4^{в,г} + 590C_2H_4^{в,г} + 555C_2H_2^{в,г} +$$

$$+ 636C_2H_6^{в,г} + 913C_3H_8^{в,г} + 1185C_4H_{10}^{в,г} + 1465C_5H_{12}^{в,г} + 234H_2S^{в,г}, \quad (6)$$

где цифры означают уменьшенные в 100 раз тепловые эффекты реакций окисления соответствующих горючих составляющих, подставленных в объемных процентах.

1.3. Отношение топлив к нагреванию без доступа окислителя

В процессе сжигания топлив часто используют подогрев исходных компонентов горения (топлива и окислителя) в целях повышения температуры горения и экономии топлива. Твердые топлива перед сжиганием не подогревают, жидкие подогревают в целях повышения жидкотекучести (уменьшения вязкости) и увеличения испарительной способности.

Газообразные топлива подогревают для повышения физического теплосодержания с целью экономии топлива. Каждая единица теплоты, внесенная с подогретым топливом, ценнее такой же единицы теплоты, образующейся при горении. Подогрев топлива

www.mahp.ustu.ru

обычно осуществляют в специальных теплоутилизационных установках, используя теплоту продуктов сгорания, покинувших рабочее пространство теплового агрегата. Результаты предварительного подогрева топлива и окислителя будут показаны в примерах расчетов горения топлив.

Таким образом, проанализировав основные характеристики топлив, можно перейти к рассмотрению самого процесса горения.

2. ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ И ЦЕЛЬ ЕГО РАСЧЕТА

Горение любого топлива осуществляется в целях получения определенного количества теплоты, необходимой для проведения какого-либо технологического процесса, требующего развития высоких температур.

Как уже отмечалось, процесс горения – это окисление горючих элементов топлива с выделением теплоты, поэтому в общем виде этот процесс можно представить в виде

$$Г + О = ПГ + Q,$$

где $Г$ – горючие составляющие топлива; $О$ – окислитель; $ПГ$ – продукты горения; Q – теплота, выделяемая при горении.

В качестве окислителя в промышленных и бытовых теплотехнических установках обычно используют атмосферный воздух или воздух, обогащенный кислородом, вырабатываемым на специальных станциях.

В большинстве случаев топливо в тепловых агрегатах сжигают полностью. В данном пособии рассмотрены именно эти условия.

2.1. Цель расчета процесса горения

Расчет горения топлива имеет целью определение количественных характеристик, к которым относят расход атмосферного воздуха или воздуха, обогащенного кислородом, необходимый для полного сжигания единицы топлива (L, м³/кг или м³/м³), выход (V, м³/кг или м³/м³) и состав продуктов полного сгорания, а также температуру горения топлива ($t_{гор}$, °С). Расчет указанных характеристик можно осуществлять либо на основе предоставленного химического состава топлива (точные расчеты), либо на основе знания только теплоты сгорания и вида топлива (приближенные расчеты).

www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

Если рассчитываемые характеристики получаются в результате строго точного учета количества кислорода для полного окисления горючих составляющих, то говорят, что эти характеристики получены на основе стехиометрических соотношений, и тогда им присваивают индекс "ноль".

Таким образом, минимально необходимое количество воздуха (иначе – теоретически необходимое) будет обозначаться как L_0, а теоретический выход продуктов сгорания от сжигания единицы топлива будет обозначаться как V_0.

Однако ввиду сложности процесса горения теоретически необходимого количества воздуха бывает недостаточно для полного окисления горючих составляющих топлива. На практике воздух подают с некоторым избытком для обеспечения полного горения топлива. Это количество практически введенного воздуха обозначают L_α (м^3/кг или м^3/м^3). Отношение действительно введенного количества воздуха к теоретически необходимому называют коэффициентом избытка воздуха (α):

$$\alpha = \frac{L_\alpha}{L_0} . \qquad (7)$$

Коэффициент избытка воздуха задается в технических расчетах в зависимости от вида топлива, теплоты его сгорания, условий протекания технологического процесса и типа топливосжигающего устройства. Во всех случаях, когда говорят об избытке воздуха, α всегда больше единицы ($\alpha > 1$).

При конкретном α образуется реальный (практический) выход продуктов сгорания V_α. Состав продуктов сгорания, необходимый для расчета технологического процесса, а также теплообмена в рабочем пространстве теплового агрегата, будет рассмотрен ниже для конкретных видов топлива.

И, наконец, еще одной важной характеристикой процесса горения топлива является температура горения, которая зависит от многих факторов, таких как вид топлива, его теплота сгорания, коэффициент избытка воздуха, степень обогащения дутья кислородом, температура подогрева топлива и воздуха, технологические условия сжигания топлива и т.д.

Чтобы эта характеристика была более определенной и соответствовала данному виду топлива и условиям его сжигания, принимают некоторые конкретные ограничения и допущения. Во-первых, условно допускают, что вся теплота, выделившаяся при горении единицы топлива, остается в продуктах сгорания, т.е. принимаются условия отсутствия теплообмена дымовых газов с окружающей средой (так называемые адиабатические условия). Во-вторых, допускается ввод физической теплоты с подогретыми топливом и воздухом и, в-третьих, допускается, несмотря на избыток воздуха, что часть топлива по различным причинам может не догорать, и тогда появляется унос теплоты с механическим недожогом (для твердого топлива) и с химическим недожогом (для всех видов топлив).

Тогда тепловой баланс такого адиабатического процесса может быть представлен уравнением

$$Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_н^р + Q_т + Q_в , \qquad (8)$$

где Q_2 – теплота продуктов сгорания; Q_3 – химический недожог топлива включая диссоциацию продуктов сгорания; Q_4 – механический недожог топлива; $Q_н^р$ – теплота, вносимая единицей топлива при полном горении; $Q_т$ – физическая теплота подогретого топлива; $Q_в$ – физическая теплота подогретого воздуха.

В этом уравнении отсутствуют затраты теплоты на обработку технологического материала (Q_1) и потери теплоты в окружающую среду (Q_5) ввиду адиабатических условий процесса горения.

В этом случае теплоту продуктов сгорания Q_2 можно представить как

$$Q_2 = C_{пр.сг} \, t_{гор} V_\alpha , \qquad (9)$$

где $C_{пр.сг}$ – удельная теплоемкость продуктов сгорания; $t_{гор}$ – температура горения; V_α – практический выход продуктов сгорания при сжигании единицы топлива.

Теперь можно решить уравнение (6) относительно температуры горения с подстановкой в него уравнения (9).

Если химический недожог (кроме диссоциации) и механический недожог топлива отсутствуют, но имеет место подогрев топлива и воздуха и сжигание топлива ведется с избытком воздуха, характеризуемым коэффициентом избытка α, то решение уравнения (8) позволяет получить так называемую теоретическую температуру горения, °С:

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

$$t_\alpha^{\,т} = \frac{Q_н^р + Q_т + Q_в - Q_{3\,дис}}{C_{пр.ср}\, V_\alpha}\,. \qquad (10)$$

Если имеет место реальный химический и механический недожог топлива и сохраняются те же остальные условия, то можно рассчитать так называемую балансовую температуру горения, °С:

$$t_\alpha^{\,б} = \frac{Q_н^р + Q_т + Q_в - Q_3 - Q_4}{C_{пр.ср}\, V_\alpha}\,. \qquad (11)$$

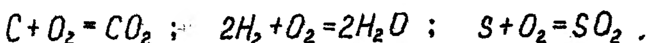
Таким образом, все необходимые характеристики процесса горения подвергнуты расчету. Осталось оговорить некоторые допущения, которые принимаются при осуществлении технических расчетов по горению.

2.2. Ограничения и допущения, принимаемые в технических расчетах горения топлива

Первое, что еще раз необходимо подчеркнуть, - все расчеты ведутся на единицу топлива (1 кг для твердых и жидких и 1 $м^3$ для газообразных топлив). Во-вторых, все газовые объемы рассчитываются при нормальных условиях, т.е. при 0°С и давлении 760 мм рт.ст. В-третьих, объем одного киломоля газов в этих условиях принимают равным 22,4 $м^3$. В-четвертых, в качестве окислителя используют атмосферный воздух, состав которого принимают неизменным: 21% кислорода и 79% азота. Соотношение азота и кислорода воздуха представляют в виде константы $K = \frac{79}{21} = 3,76$. При обогащении дутья кислородом константа соотношения азота и кислорода уменьшается. Значение константы с изменением содержания кислорода в дутье приведено ниже:

Содержание O_2 в дутье, об.%	21	25	33	40	50	60	70	80	90
$K = \frac{N_2}{O_2}$	3,76	3,0	2,0	1,5	1,0	0,66	0,43	0,25	0,11

Рассмотрим прежде всего точные расчеты горения топлив, основанные на стехиометрических соотношениях горючих составляющих и окислителя. Такие расчеты принято называть аналитическими.



3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВ

Для аналитического расчета необходимо знать элементарный состав топлива

$$C^р + H^р + O^р + N^р + S^р + A^р + W^р = 100\%.$$

Сложность расчета заключается в том, что состав топлива задан в массовых процентах, а кислород, необходимый для окисления горючих элементов, нужно определить в кубических метрах. Ключом к решению этой задачи является мольное соотношение кислорода и горючего элемента в реакции окисления.

3.1. Определение объема кислорода для окисления горючих элементов топлива

Рассмотрим соответствующие реакции окисления:

$$C + O_2 = CO_2\;;\quad 2H_2 + O_2 = 2H_2O\;;\quad S + O_2 = SO_2\,.$$

Для окисления одного моля углерода массой 12 кг требуется один моль кислорода, занимающего объем 22,4 $м^3$. Следовательно, расход кислорода на окисление 1 кг углерода будет равен $\frac{22,4}{12} = 1,867$ $м^3$/кг. Для окисления углерода $C^р$%, содержащегося в 1 кг данного топлива, потребуется $V_{O_2}^{C} = 0,01 \cdot 1,867\, C^р$ $м^3$ кислорода.

Для окисления двух молей водорода массой 4 кг требуется только один моль кислорода, т.е. на горение 1 кг водорода необходимо затратить кислорода $\frac{22,4}{4} = 5,6$ $м^3$/кг. Тогда для окисления водорода в количестве $H^р$ % потребуется объем кислорода

$$V_{O_2}^{H} = 0,01 \cdot 5,6\, H^р \ м^3.$$

Аналогично получим для серы

$$V_{O_2}^{S} = 0,01\,\frac{22,4\, S^р}{32} = 0,01 \cdot 0,7\, S^р \ м^3.$$

Необходимо учесть, что в состав твердых и жидких топлив входит некоторое количество кислорода $O^р$, которое при горении топлива может участвовать в реакциях окисления, поэтому

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

из суммарного объема кислорода, необходимого для горения I кг топлива, следует вычесть объем кислорода топлива.

Произведем пересчет, также используя мольное соотношение: один моль кислорода массой 32 кг занимает объем 22,4 м^3, т.е. I кг кислорода имеет объем $\frac{22,4}{32}$ = 0,7 м^3. Следовательно, объем кислорода, содержащегося в I кг топлива, составит

$$V_{O_2}^{O} = 0{,}01 \cdot 0{,}7\, O^P \text{ м}^3.$$

Отсюда общий расход кислорода, необходимого для полного горения I кг жидкого или твердого топлива, будет равен

$$V_{O_2} = V_{O_2}^{C} + V_{O_2}^{H} + V_{O_2}^{S} - V_{O_2}^{O} =$$

$$= 0{,}01(1{,}867\, C^P + 5{,}6\, H^P + 0{,}7\, S^P - 0{,}7\, O^P) \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3.2. Определение количества воздуха для сжигания I кг топлива

Теоретическое количество сухого воздуха можно определить из выражения, м^3/кг:

$$L_0^{с.в} = (1+k) V_{O_2}. \qquad (13)$$

Действительный расход сухого воздуха, м^3/кг:

$$L_\alpha^{с.в} = \alpha L_0^{с.в}. \qquad (14)$$

Влагосодержание воздуха, как и горючих газов, задают в количестве граммов водяных паров, приходящихся на I м^3 сухого воздуха $g^{с.в}$ г/м^3. Объем, занимаемый этой влагой, можно определить, используя мольное соотношение. Один моль водяных паров массой 18 кг занимает объем 22,4 м^3, а объем I г влаги равен $\frac{22,4}{18 \cdot 1000}$ = 0,00124 м^3/г. Тогда объем водяных паров, содержащихся в воздухе, необходимый для горения единицы топлива, будет равен 0,00124 $g^{с.в} L_0^{с.в}$, в теоретический и действительный расходы влажного воздуха составят, м^3/кг:

$$L_0^{в.в} = (1 + 0{,}00124\, g^{с.в}) L_0^{с.в}, \qquad (15)$$

$$L_\alpha^{в.в} = \alpha L_0^{в.в}. \qquad (16)$$

3.3. Определение выхода и состава продуктов сгорания

При полном сгорании топлива с α = I образуются продукты сгорания, содержание CO_2, SO_2, H_2O и N_2.

Объем дымовых газов, образующихся при сгорании I кг твердого или жидкого топлива при α = I, будет равен, м^3/кг:

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} \qquad (17)$$

Если вновь вернуться к реакции окисления углерода, то, используя мольное соотношение, можно определить, что из одного моля углерода массой 12 кг образуется один моль CO_2 объемом 22,4 м^3, т.е. в результате окисления I кг углерода образуется 1,867 м^3 диоксида углерода, а объем CO_2

$$V_0^{CO_2} = 0{,}01 \cdot 1{,}867\, C^P \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Аналогичные рассуждения помогут определить объем образовавшегося SO_2:

$$V_0^{SO_2} = 0{,}01 \cdot 0{,}7\, S^P \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В продуктах полного сгорания твердого или жидкого топлива водяной пар может образовываться:

1) при окислении водорода;

2) переходе из топлива в результате испарения содержащейся в нем влаги;

3) внесении влажным атмосферным дутьем.

Кроме того, при сжигании мазута в некоторых случаях его распыливают паром, который также полностью переходит в дымовые газы (W^{Φ}, %).

Объем (м^3/кг) водяных паров при окислении водорода можно определить из мольного соотношения по реакции его горения: из одного моля водорода массой 2 кг образуется один моль водяных паров объемом 22,4 м^3. Тогда

$$V_{H_2O}^{H} = 0{,}01 \cdot 11{,}2\, H^P.$$

При испарении влаги топлива и распылителя из одного моля воды массой 18 кг образуется один моль паров объемом 22,4 м^3, тогда объем этой влаги составит

Библиотека
Уральского государственного
технического университета-УПИ

www.mahp.ustu.ru
www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

$$V_{H_2O}^{w^p+w^\phi} = 0{,}01\cdot 1{,}244\left(W^p + W^\phi\right) \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяных паров, внесенных с воздухом, равен

$$V_{H_2O}^{возд} = 0{,}00124\, g^{c.в} L_o^{c.в} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Источниками азота в продуктах полного сгорания являются само топливо (N^p %) и атмосферный воздух или обогащенное дутье.

По массе моля азота (28 кг) и его объему (22,4 м^3) легко определить объем I кг азота: $\frac{22{,}4}{28} = 0{,}8$ м^3.

Тогда

$$V_{N_2}^{топ} = 0{,}01\cdot 0{,}8\, N^p \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В атмосферном воздухе при соотношении азота и кислорода $k = \frac{N_2}{O_2}$ объем азота составляет, м^3:

$$V_{N_2}^{воз} = k\, V_{O_2}.$$

Общий объем азота в дымовых газах, м^3/кг:

$$V_o^{N_2} = 0{,}01\cdot 0{,}8\, N^p + k V_{O_2}.$$

Состав продуктов полного сгорания при сжигании I кг топлива с $\alpha = 1$ может быть определен следующим образом:

$$CO_2 = \frac{V_o^{CO_2}}{V_o}\, 100\%; \qquad N_2 = \frac{V_o^{N_2}}{V_o}\, 100\%;$$

$$SO_2 = \frac{V_o^{SO_2}}{V_o}\, 100\%; \qquad H_2O = \frac{V_o^{H_2O}}{V_o}\, 100\%. \qquad (18)$$

Объем и состав продуктов сгорания при $\alpha > 1$ будет отличаться от аналогичных характеристик при $\alpha = 1$ вследствие введения избыточного воздуха.

В связи с тем, что при $\alpha = 1$ предусматривается полное окисление горючих компонентов, объем CO_2, SO_2 и H_2O, естественно, не изменится и при $\alpha > 1$. Но избыточный воздух повлияет на величины V_{H_2O} и V_{N_2}, м^3/кг:

$$V_\alpha^{H_2O} = V_o^{H_2O} + 0{,}00124\, g^{c.в}(\alpha - 1) L_o^{c.в},$$

www.mahp.ustu.ru

$$V_\alpha^{N_2} = V_o^{N_2} + k(\alpha - 1) V_{O_2}.$$

В дополнение к этому в продуктах сгорания появится свободный (избыточный) кислород, объем, м^3/кг, которого определяют как

$$V_o^{изб} = (\alpha - 1) V_{O_2}.$$

С учетом всех дополнений можно рассчитать объем, м^3/кг, продуктов сгорания при $\alpha > 1$

$$V_\alpha = V_\alpha^{CO_2} + V_\alpha^{SO_2} + V_\alpha^{H_2O} + V_\alpha^{N_2} + V_{O_2}^{изб}. \qquad (19)$$

Состав продуктов сгорания при $\alpha > 1$:

$$CO_2 = \frac{V_\alpha^{CO_2}}{V_\alpha}\cdot 100\%;$$

$$SO_2 = \frac{V_\alpha^{SO_2}}{V_\alpha}\cdot 100\%;$$

$$H_2O = \frac{V_\alpha^{H_2O}}{V_\alpha}\cdot 100\%; \qquad (20)$$

$$N_2 = \frac{V_\alpha^{N_2}}{V_\alpha}\cdot 100\%;$$

$$O_2^{изб} = \frac{V_{O_2}^{изб}}{V_\alpha}\cdot 100\%.$$

3.4. Расчет температуры горения

Приведенные в п.2.I формулы (I0) и (II) в принципе позволяют рассчитывать теоретическую и балансовую температуры горения топлив. Но расчеты эти достаточно затруднены, поскольку входящая в указанные формулы теплоемкость продуктов сгорания сама является функцией искомой температуры.

www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

С.Г.Тройбом был предложен расчет температур горения различных топлив с использованием it-диаграмм, исключающих громоздкие расчеты.

Эти диаграммы построены в координатах "температура – общее теплосодержание продуктов сгорания" (см.прил.I). Общее теплосодержание $i_{общ}$ представляет собой произведение удельной теплоемкости продуктов сгорания $C_{пр.сг}$ на температуру этих продуктов сгорания. Если в формулах (10) и (11) $C_{пр.сг}$ из знаменателя правой части перенести в левую часть равенства, то мы и получим $i_{общ}$. Тогда в правой части равенства, разделив почленно числитель на величину V_α, мы получим отдельные составляющие общего теплосодержания продуктов сгорания.

Итак, химическая энтальпия, кДж/м³, продуктов сгорания выражается как

$$i_x = \frac{Q_н^р}{V_\alpha}, \qquad (21)$$

физическая энтальпия, кДж/м³, подогретого топлива

$$i_т = \frac{c_т t_т}{V_\alpha}, \qquad (22)$$

где $c_т$ – удельная теплоемкость подогретого топлива; $t_т$ – температура подогрева топлива.

Энтальпия, кДж/м³, подогретого воздуха в этом случае будет выражена как

$$i_в = \frac{c_в t_в L_\alpha}{V_\alpha}, \qquad (23)$$

где $c_в$ – удельная теплоемкость подогретого воздуха; $t_в$ – температура подогрева воздуха; L_α – количество воздуха для сжигания единицы топлива.

И, наконец, энтальпия химического и механического недожога топлива записывается в виде

$$\left.\begin{aligned} i_3 &= \frac{Q_3}{V_\alpha}; \\ i_4 &= \frac{Q_4}{V_\alpha}. \end{aligned}\right\} \qquad (24)$$

значения Q_3 и Q_4 либо принимают в долях от $Q_н^р$ в зависимости от вида топлива и способа его сжигания, либо рассчитывают по имеющимся данным анализа состава продуктов сгорания. Таким образом, для определения теоретической температуры горения топлива $t_\alpha^т$, кДж/м³, общее теплосодержание рассчитывают по формуле

$$i_{общ} = i_x + i_т + i_в - i_{3\,дис}, \qquad (25)$$

причем величина $i_{3\,дис}$ уже учтена при построении it-диаграмм и в расчет по формуле (25) не входит. Определение балансовой температуры горения $t_\alpha^б$, кДж/м³, осуществляется на основании расчета общего теплосодержания

$$i_{общ}^б = i_x + i_т + i_в - i_3 - i_4. \qquad (26)$$

В прил.I приведены три it-диаграммы, каждая из которых относится к определенной группе топлив. В первую группу входят газообразные топлива с теплотой сгорания $Q_н^р >$ 12000 кДж/м³ (прил.I, рис.I).

Вторая группа топлив включает смеси газов с $Q_н^р$ = 8000...12000 кДж/м³, мазут, каменные угли, антрацит и кокс (прил.I, рис.2). В третью группу топлив включены смеси газов с $Q_н^р <$ 8000 кДж/м³, бурые угли и торф (прил.I, рис.3).

Каждая из диаграмм представляет семейство сплошных и пунктирных кривых. По сплошным кривым определяют теоретическую температуру горения $t_\alpha^т$, а по пунктирным – балансовую $t_\alpha^б$. Серия сплошных и пунктирных кривых позволяет установить зависимость температуры горения от избыточного воздуха в продуктах сгорания. Этот параметр рассчитывают по формуле

$$v = \frac{L_\alpha - L_0}{V_\alpha} \cdot 100\%. \qquad (27)$$

Ключ к работе с it-диаграммой таков: по формулам (21)-(26) рассчитывают теплосодержание $i_{общ}$ и $i_{общ}^б$; затем по формуле (27) определяют величину v_L. В зависимости от вида топлива и величины теплоты его сгорания $Q_н^р$ выбирают нужную it-диаграмму (см.прил.I), на оси ординат которой откладывают значение $i_{общ}$, и проводят горизонтальную линию до соответствующей сплошной кривой, означающей рассчитанное значение v_L. Из точки пересечения опускают перпендикуляр

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

на ось абсцисс и читают значение $t_\alpha^т$. То же самое проделывают при определении $t_\alpha^б$ с той лишь разницей, что на ординате откладывают величину $i_{общ}^б$ и горизонталь приводят до соответствующей пунктирной кривой значения V_α.

4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

В отличие от твердого и жидкого топлива химический состав газообразного топлива приводится на сухую массу. Для пересчета состава топлива на рабочую массу необходимо знать значение влагосодержания $g^{с.г}$, которое можно выбрать по таблице на с. 8. По формулам (3) или (3а) рассчитывают процентное содержание водяных паров в газообразном топливе и по формуле (4) производят пересчет всех элементов топлива на рабочую массу. После пересчета сумма всех химических элементов топлива, включая H_2O, должна равняться 100%.

Далее по формуле (6) рассчитывают теплоту сгорания топлива $Q_н^р$.

4.1. Расчет объема кислорода и воздуха для сжигания 1 м³ газа

Итак, имеем элементарный состав газообразного топлива

$$CO^{в,г}+H_2^{в,г}+CH_4^{в,г}+C_mH_n^{в,г}+H_2S^{в,г}+CO_2^{в,г}+N_2^{в,г}+O_2^{в,г}+...+H_2O^{в,г}=100\%.$$

Вывод расчетных формул для газообразного топлива намного проще, чем для твердого и жидкого, поскольку топливо и окислитель имеют одно и то же агрегатное состояние. Запишем соответствующие реакции окисления горючих составляющих топлива:

$$CO+0{,}5O_2=CO_2;$$

$$H_2+0{,}5O_2=H_2O;$$

$$CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O;$$

$$C_mH_n+\left(m+\frac{n}{2}\right)O_2=mCO_2+\frac{n}{2}H_2O;$$

$$H_2S+1{,}5O_2=SO_2+H_2O.$$

как видно из уравнений, на каждый моль горючей газообразной составляющей приходится определенное количество кислорода, поэтому для определения количества кислорода, м³/м³, составляют простое уравнение, соответствующее стехиометрическим соотношениям при $\alpha=1$:

$$V_{O_2}^{\prime}=0{,}01\left[0{,}5(CO^{в,г}+H_2^{в,г})+\left(m+\frac{n}{4}\right)\Sigma C_mH_n^{в,г}+1{,}5H_2S^{в,г}-O_2^{в,г}\right]. \quad (28)$$

Далее по формуле (13) находим количество воздуха, подаваемого для горения одного кубического метра газообразного топлива при $\alpha=1$, а по формуле (14) – при $\alpha>1$.

4.2. Расчет выхода продуктов сгорания

Продукты полного сгорания газообразного топлива состоят из CO_2, SO_2, H_2O и N_2. Поскольку CO_2 и SO_2 при анализе состава продуктов горения не разделимы, в дальнейшем будем обозначать обе молекулы одним условным обозначением RO_2.

Найдем объемы, м³/м³, отдельных составляющих продуктов сгорания при $\alpha=1$:

$$V_0^{RO_2}=0{,}01\left(RO_2^{в,г}+CO^{в,г}+H_2S^{в,г}+m\Sigma C_mH_n^{в,г}\right), \quad (29)$$

$$V_0^{H_2O}=0{,}01\left(H_2O^{в,г}+H_2^{в,г}+H_2S^{в,г}+\frac{n}{2}\Sigma C_mH_n^{в,г}\right), \quad (30)$$

$$V_0^{N_2}=0{,}01N_2^{в,г}+kV_{O_2}. \quad (31)$$

Тогда выход, м³/м³, продуктов сгорания при сжигании 1 м³ газообразного топлива при $\alpha=1$ составит

$$V_0=V_0^{RO_2}+V_0^{H_2O}+V_0^{N_2}. \quad (32)$$

При сжигании 1 м³ газообразного топлива с $\alpha>1$ в продуктах сгорания появится избыточный воздух, который повлияет только на объем азота V_{N_2} и даст избыточный кислород, поэтому при $\alpha>1$

$$V_\alpha^{N_2}=0{,}01N_2^{в,г}+\alpha kV_{O_2}, \quad (33)$$

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

$$V_{O_2}^{изб} = (\alpha - 1) V_{O_2} , \qquad (34)$$

Тогда выход, м^3/м^3, продуктов сгорания при $\alpha > 1$

$$V_\alpha = V_\alpha^{RO_2} + V_\alpha^{H_2O} + V_\alpha^{N_2} + V_{O_2}^{изб} \qquad (35)$$

При этом необходимо отметить, что $V_0^{RO_2} = V_\alpha^{RO_2}$ и $V_0^{H_2O} = V_\alpha^{H_2O}$. Расчет состава продуктов сгорания и температуры горения осуществляется так же, как для твердого и жидкого топлива (см.пп.3.3 и 3.4).

5. ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Инженерные расчеты тепловых процессов горения топлив допускают погрешности в пределах 1–5%.

Учитывая, что зависимость между теплотой сгорания топлива и расходом воздуха и выходом продуктов сгорания является линейной, а разность между объемом продуктов сгорания и количеством воздуха, подаваемого для горения единицы топлива, есть величина постоянная для данного вида топлива $(\Delta V = V_0 - L_0 = V_\alpha - L_\alpha)$, С.Г.Тройб предложил формулы для определения количественных характеристик процесса горения как функции теплоты сгорания топлива (L_0, ΔV , м^3/кг (м^3/м^3); V_0, V_α ,м^3/м^3):

$$L_0 = 0{,}001 \ell_1 Q_н^р + \ell_2 W^р - \Delta L , \qquad (36)$$

$$\Delta V = S_1 - 0{,}001 S_2 Q_н^р - 0{,}0124 (W^р - W_{гр}) , \qquad (37)$$

$$V_0 = L_0 + \Delta V , \qquad (38)$$

$$V_\alpha = L_\alpha + \Delta V , \qquad (39)$$

где ℓ_1, ℓ_2, S_1, S_2 – коэффициенты; ΔL и $W_{гр}$ – поправки.

Значения коэффициентов и поправок приведены в прил.2.

Сопоставление результатов расчета характеристик процесса горения, вычисленных аналитическим методом и по приближенным формулам, показывает, что в большинстве случаев расхождение

составляет не более 1–3%, что практически не оказывает влияния на величину температуры горения топлива.

6. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

В практике эксплуатации тепловых агрегатов встречается сжигание так называемого комбинированного топлива, т.е. состоящего из двух и более видов.

Например, на металлургических заводах широко используется коксодоменная смесь, состоящая из доменного и коксового газов, смешанных друг с другом в различных пропорциях в зависимости от требуемой теплоты сгорания.

Ввиду напряженного топливного баланса металлургических заводов с полным циклом в последнее время в коксодоменную смесь добавляют природный газ. Таким образом, получается смесь уже трех видов топлива. На некоторых заводах применяют совместное сжигание газообразного и жидкого топлива, например коксодоменной смеси и мазута, природного газа и мазута и т.д.

Во всех случаях расчеты процесса горения смесей различных топлив усложняются.

6.1. Расчет характеристик горения смесей газообразных топлив

Если расчет необходимо провести аналитическим способом, т.е. когда задан химсостав смеси различных газообразных топлив, то методика ничем не отличается от той, которая изложена в гл.4.

Если же расчет горения газообразной топливной смеси ведется по приближенным формулам, то здесь надо знать пропорцию или доли отдельных видов газообразного топлива в газовой смеси. Например, доля доменного газа – x , а доля коксового газа – y в коксодоменной смеси. Эти доли могут быть назначены, а могут быть и вычислены, если известны теплота сгорания доменного газа $(Q_н^р)_{д.г}$, коксового газа $(Q_н^р)_{к.г}$ и их смеси $(Q_н^р)_{см}$. Тогда составляют два уравнения, из которых и определяют соответствующие доли:

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

$$\left.\begin{aligned} & x + y = 1, \\ & x(Q_н^р)_{д.г} + y(Q_н^р)_{к.г} = (Q_н^р)_{см} \end{aligned}\right\} \quad (40)$$

Далее рассчитывают раздельно для каждого вида газообразного топлива характеристики L_0 и V_0, L_α и V_α, используя данные прил.2, а затем, применяя долевые соотношения, рассчитывают эти характеристики, м³/м³, для топливной смеси в целом:

$$\left.\begin{aligned} & L_{0см} = x L_{0д.г} + y L_{0к.г}, \\ & V_{0см} = x V_{0д.г} + y V_{0к.г}, \\ & \Delta V_{см} = V_{0см} - L_{0см}, \\ & L_{\alpha см} = \alpha L_{0см}, \\ & V_{\alpha см} = L_{\alpha см} + \Delta V_{см}. \end{aligned}\right\} \quad (41)$$

6.2. Расчет характеристик горения смесей газообразных и жидких топлив

В случае, когда сжигаются совместно газообразное и жидкое топлива, например природный газ и мазут, необходимо знать пропорции подаваемых топлив. А далее, независимо от метода расчета, определяются раздельно для газообразного и жидкого топлив соответствующие характеристики $L_{0г}$, $L_{0ж}$, $L_{\alpha г}$, $L_{\alpha ж}$, $V_{0г}$, $V_{0ж}$, $V_{\alpha г}$ и $V_{\alpha ж}$ (см. гл.3 и 4).

Эти характеристики используются при расчете абсолютных расходов воздуха $V_в$ и продуктов сгорания $V_{пр.сг}$ при сжигании газообразного топлива в количестве $B_г$ м³/ч и жидкого топлива в количестве $B_ж$ кг/ч:

$$\left.\begin{aligned} & V_в = L_{\alpha г} B_г + L_{\alpha ж} B_ж, \\ & V_{пр.сг} = V_{\alpha г} B_г + V_{\alpha ж} B_ж. \end{aligned}\right\} \quad (42)$$

Расчет температур горения осуществляют с использованием it-диаграмм, предварительно определив общие энтальпии.

При расчете $i_{общ}$ и $i^в_{общ}$ может возникнуть затруднение с определением $i_т = c_т t_т$ при подогреве топлива, поскольку химический состав его неизвестен и невозможно подсчитать удельную теплоемкость $c_т$.

В этом случае необходимо воспользоваться данными прил.4.

7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ

7.1. Расчет горения жидкого топлива

7.1.1. Исходные данные

Задан химический состав мазута

$C^р$	$H^р$	$O^р$	$N^р$	$S^р$	$A^р$	$W^р$
85,9	9,9	0,5	0,3	0,4	0,2	2,8

Кроме того, известны:
коэффициент избытка воздуха α = 1,28;
Влажность воздуха $g^{св}$ = 13,9 г/м³;
Температура мазута $t_т$ = 98°С;
Температура подогрева воздуха $t_в$ = 300°С.

7.1.2. Определение количества воздуха, необходимого для сжигания 1 кг мазута

Рассчитываем количество кислорода, окисляющего все горючие компоненты мазута:

$$V_{O_2} = 0{,}01(1{,}867\,C^р + 5{,}6\,H^р + 0{,}7\,S^р - 0{,}7\,O^р) =$$
$$= 0{,}01(1{,}867\cdot 85{,}9 + 5{,}6\cdot 9{,}9 + 0{,}7\cdot 0{,}4 - 0{,}7\cdot 0{,}5) =$$
$$= 2{,}157 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический расход сухого атмосферного воздуха будет равен

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

$$L_0^{с.в} = (1+k) V_{O_2} = (1 + 3,76) \cdot 2,157 = 10,27 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический расход влажного воздуха:

$$L_0^{в.в} = (1 + 0,00124\, g^{с.в}) L_0^{с.в} =$$
$$= (1 + 0,00124 \cdot 13,9) \cdot 10,27 = 10,44 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Действительный расход влажного воздуха:

$$L_\alpha^{в.в} = \alpha L_0^{в.в} = 1,28 \cdot 10,44 = 13,36 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

7.1.3. Определение количества (V_0) и состава продуктов горения мазута при $\alpha = 1$

Количество диоксида углерода:

$$V_0^{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867\, C^р = 0,01 \cdot 1,867 \cdot 85,9 = 1,604 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество диоксида серы:

$$V_0^{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7\, S^р = 0,01 \cdot 0,7 \cdot 0,4 = 0,003 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество водяных паров:

$$V_0^{H_2O} = 0,01\,(11,2 H^р + 1,244 W^р) + 0,00124\, g^{с.в} L_0^{с.в} =$$
$$= 0,01\,(11,2 \cdot 9,9 + 1,244 \cdot 2,8) + 0,00124 \cdot 13,9 \cdot 10,27 =$$
$$= 1,319 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество азота:

$$V_0^{N_2} = 0,01 \cdot 0,8 N^р + k V_{O_2} =$$
$$= 0,01 \cdot 0,8 \cdot 0,3 + 3,76 \cdot 2,157 = 8,11 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий объем продуктов горения при $\alpha = 1$

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} =$$
$$= 1,604 + 0,003 + 1,319 + 8,11 = 11,04 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Состав дымовых газов:

$$CO_2 = \frac{V_0^{CO_2} \cdot 100}{V_0} = \frac{1,604 \cdot 100}{11,04} = 14,53\%;$$

$$SO_2 = \frac{V_0^{SO_2} \cdot 100}{V_0} = \frac{0,003 \cdot 100}{11,04} = 0,03\%;$$

$$N_2 = \frac{V_0^{N_2} \cdot 100}{V_0} = \frac{8,11 \cdot 100}{11,04} = 73,46\%;$$

$$H_2O = \frac{V_0^{H_2O} \cdot 100}{V_0} = \frac{1,139 \cdot 100}{11,04} = 11,98\%.$$

7.1.4. Определение количества (V_α) и состава продуктов горения при $\alpha = 1,28$

Количество диоксида углерода и диоксида серы останутся такими же, как и при $\alpha = 1$:

$$V_\alpha^{CO_2} = V_0^{CO_2} = 1,604 \text{ м}^3/\text{кг}; \qquad V_\alpha^{SO_2} = V_0^{SO_2} = 0,003 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество водяных паров увеличится за счет влаги избыточного воздуха:

$$V_\alpha^{H_2O} = V_0^{H_2O} + 0,00124\, g^{с.в} (\alpha - 1) L_0^{с.в} =$$
$$= 1,319 + 0,00124 \cdot 13,9 \cdot (1,28 - 1) \cdot 10,27 = 1,368 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

За счет избыточного воздуха увеличится и количество азота:

$$V_\alpha^{N_2} = V_0^{N_2} + k(\alpha - 1) V_{O_2} = 8,11 + 3,76 \cdot (1,28 - 1) \cdot 2,157 =$$
$$= 10,48 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В продуктах горения появится свободный кислород избыточного воздуха:

$$V_{O_2}^{изб} = (\alpha - 1) V_{O_2} = (1,28 - 1) \cdot 2,157 = 0,604 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий объем продуктов горения при $\alpha = 1,28$:

$$V_\alpha = V_\alpha^{CO_2} + V_\alpha^{SO_2} + V_\alpha^{H_2O} + V_\alpha^{N_2} + V_{O_2}^{изб} =$$
$$= 1,604 + 0,003 + 1,368 + 10,48 + 0,604 = 14,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Состав продуктов горения:

$$CO_2 = \frac{V_\alpha^{CO_2} \cdot 100}{V_\alpha} = \frac{1,604 \cdot 100}{14,06} = 11,41\%;$$

$$SO_2 = \frac{V_\alpha^{SO_2} \cdot 100}{V_\alpha} = \frac{0,003 \cdot 100}{14,06} = 0,02\%;$$

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

$$H_2O = \frac{V_\alpha^{H_2O} \cdot 100}{V_\alpha} = \frac{1,368 \cdot 100}{14,06} = 9,73\%;$$

$$N_2 = \frac{V_\alpha^{N_2} \cdot 100}{V_\alpha} = \frac{10,48 \cdot 100}{14,06} = 74,54\%;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}^{изб} \cdot 100}{V_\alpha} = \frac{0,604 \cdot 100}{14,06} = 4,30\%.$$

7.1.5. Рассчитаем низшую теплоту сгорания мазута:

$$Q_н^р = 339\,C^р + 1030\,H^р + 109\,(O^р - S^р) - 25\,(9H^р + W^р) =$$
$$= 339 \cdot 85,9 + 1030 \cdot 9,9 + 109 \cdot (0,5 - 0,4) - 25\,(9 \cdot 9,9 + 2,8) = 37030,5 \text{ кДж/кг}.$$

7.1.6. Рассчитаем температура горения

Сначала определим общее теплосодержание продуктов горения мазута без учета диссоциации, кДж/м^3:

$$i_{общ} = i_x + i_в + i_т .$$

Энтальпия единицы объема дымовых газов за счет химической энергии мазута:

$$i_x = \frac{Q_н^р}{V_\alpha} = \frac{37030,5}{14,06} = 2634 \text{ кДж/м}^3.$$

Подогретый до 300°С вентиляторный воздух вносит в один кубометр отходящих газов, кДж/м^3:

$$i_в = \frac{c_в\, t_в\, L_\alpha}{V_\alpha} .$$

Среднюю теплоемкость воздуха $c_в$ находим по таблице (прил. 3):

$$c_в = 1,315 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тогда

$$i_в = \frac{1,315 \cdot 300 \cdot 13,36}{14,06} = 375 \text{ кДж/м}^3.$$

www.mahp.ustu.ru

За счет подогрева мазута единица продуктов горения получает, кДж/м^3:

$$i_т = \frac{c_т\, t_т}{V_\alpha}$$

Средняя теплоемкость мазутов в интервале температур 20...100°С изменяется в пределах 1,88...2,28 кДж/(кг·К).

Тогда

$$i_т = \frac{2,2 \cdot 98}{14,06} = 15 \text{ кДж/м}^3;$$

$$i_{общ} = 2634 + 375 + 15 = 3024 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитаем относительное содержание избыточного воздуха в единице продуктов горения мазута:

$$V_L = \frac{L_\alpha - L_0}{V_\alpha} \cdot 100 = \frac{13,36 - 10,44}{14,06} = 20,7\%.$$

По it-диаграмме для мазутов (прил. 1, рис. 2) находим теоретическую температуры горения: $t_\alpha^т = 1875$°С.

7.2. Расчет процесса горения природного газа

7.2.1. Исходные данные

Сжигается природный газ, элементарный состав которого на сухую массу, %:

$CH_4^{ср} = 98,0$; $C_3H_8^{ср} = 0,9$; $C_4H_{10}^{ср} = 0,8$; $N_2^{ср} = 0,3$.

Влагосодержание газа составляет $g = 5,0$ г/м^3 сухого газа.

Температура подогрева газа $t_т = 20$°С.

Температура подогрева воздуха $t_в = 400$°С.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,15$.

Химический недожог топлива $q_3 = 0,02\, Q_н^р$.

Механический недожог отсутствует.

www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

7.2.2. Пересчет состава газа на рабочую (влажную) массу

Используя формулу (3а), рассчитаем процентное содержание водяных паров в I м³ природного газа при влагосодержании $g^{с.г} = 5,0$ г/м³ сухого газа:

$$H_2O^{в.г} = \frac{0,I244 \cdot 5,0}{I + 0,00I24 \cdot 5,0} = 0,6I8\%.$$

По формуле (4) пересчитаем состав газа на рабочую массу:

$$CH_4^{в.г} = CH_4^{с.г} \cdot \frac{I00 - H_2O^{в.г}}{I00} = 98,0 \cdot \frac{I00 - 0,6I8}{I00} = 97,394\%;$$

$$C_3H_8^{в.г} = 0,9 \cdot 0,99382 = 0,894\%;$$

$$C_4H_{10}^{в.г} = 0,8 \cdot 0,99382 = 0,796\%;$$

$$N_2^{в.г} = 0,3 \cdot 0,99382 = 0,298\%.$$

Для проверки правильности расчета суммируем полученные данные по влажному составу газа:

$$CH_4^{в.г} + C_3H_8^{в.г} + C_4H_{10}^{в.г} + N_2^{в.г} =$$

$$= 97,394 + 0,894 + 0,796 + 0,298 = I00\%,$$

следовательно, пересчет на влажную массу произведен верно.

7.2.3. Расчет количества кислорода и воздуха для сжигания I м³ газа

По формуле (28) найдем объем кислорода, необходимый для окисления горючих составляющих природного газа (в формулу подставляем только те химические элементы, которые даны в задании; остальные, отсутствующие в газе, приравниваем нулю):

$$V_{O_2} = 0,0I\,(2\,CH_4^{в.г} + 5\,C_3H_8^{в.г} + 6,5\,C_4H_{10}^{в.г}) =$$

$$= 0,0I \cdot (2 \cdot 97,394 + 5 \cdot 0,894 + 6,5 \cdot 0,796) =$$

$$= 2,04432 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Далее по формуле (I3) находим количество воздуха при $\alpha = I$, необходимое для сжигания I м³ природного газа, используя соотношение азота и кислорода в воздухе $K = 3,76$:

$$L_0 = (I + 3,76) \cdot 2,04432 = 9,73 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Практически введенное количество воздуха при $\alpha = I,I5$ по формуле (I4) составит $L_\alpha = I,I5 \cdot 9,73 = II,I9$ м³/м³.

7.2.4. Расчет объема и состава продуктов сгорания при сжигании I м³ газа

Сначала найдем объем продуктов сгорания при $\alpha = I$, используя формулы (29)-(32):

$$V_0^{RO_2} = 0,01\,(CH_4^{в.г} + 3C_3H_8^{в.г} + 4\,C_4H_{10}^{в.г}) =$$

$$= 0,0I\,(97,394 + 3 \cdot 0,894 + 4 \cdot 0,796) = I,033 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_0^{H_2O} = 0,01\,(H_2O^{в.г} + 2\,CH_4^{в.г} + 4C_3H_8^{в.г} + 5\,C_4H_{10}^{в.г}) =$$

$$= 0,0I \cdot (0,6I8 + 2 \cdot 97,394 + 4 \cdot 0,894 + 5 \cdot 0,796) =$$

$$= 2,03 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_0^{N_2} = 0,0I\,N_2^{в.г} + 3,76\,V_{O_2} = 0,0I \cdot 0,3 + 3,76 \cdot 2,04432 =$$

$$= 7,69 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Тогда

$$V_0 = I,033 + 2,03 + 7,69 = I0,753 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Выход продуктов сгорания при $\alpha = I,I5$ изменится только на величину содержания азота (N_2), внесенного с избытком воздуха, и на величину избыточного кислорода $O_2^{изб}$ (см. формулы (33) и (34)):

$$V_\alpha^{N_2} = 0,0I\,N_2^{в.г} + \alpha\,3,76\,V_{O_2} =$$

$$= 0,0I \cdot 0,3 + I,I5 \cdot 3,76 \cdot 2,04432 = 8,84 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{O_2}^{изб} = (I,I5 - I) \cdot 2,04432 = 0,307 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Тогда по формуле (35) объем продуктов сгорания при $\alpha = I,I5$ составит

$$V_\alpha = I,033 + 2,03 + 8,84 + 0,307 = I2,2I \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Состав продуктов сгорания при $\alpha = I$:

$$RO_2 = \frac{V_0^{RO_2}}{V_0} \cdot I00\% = \frac{I,033}{I0,753} \cdot I00 = 9,6I\%;$$

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

$$H_2O = \frac{V_0^{H_2O}}{V_0} \cdot 100\% = \frac{2,03}{10,753} \cdot 100 = 18,88\%$$

$$N_2 = \frac{V_0^{N_2}}{V_0} \cdot 100\% = \frac{7,69}{10,753} \cdot 100 = 71,51\%.$$

Состав продуктов сгорания при $\alpha = 1,15$:

$$RO_2 = \frac{V_\alpha^{RO_2}}{V_\alpha} \cdot 100\% = \frac{1,033}{12,21} \cdot 100 = 8,46\%$$

$$H_2O = \frac{V_\alpha^{H_2O}}{V_\alpha} \cdot 100\% = \frac{2,03}{12,21} \cdot 100 = 16,63\%;$$

$$N_2 = \frac{V_\alpha^{N_2}}{V_\alpha} \cdot 100\% = \frac{8,84}{12,21} \cdot 100 = 72,40\%;$$

$$O_2^{изб} = \frac{V_{O_2}^{изб}}{V_\alpha} \cdot 100\% = \frac{0,307}{12,21} \cdot 100 = 2,51\%.$$

7.2.5. Расчет теплоты сгорания природного газа

Воспользуемся формулой (6), подставив в нее те горючие составляющие, которые указаны в исходных данных и пересчитаны на рабочую массу в п.7.2.1:

$$Q_н^р = 358\, CH_4^{в.г} + 913\, C_3H_8^{в.г} + 1185\, C_4H_{10}^{в.г} =$$

$$= 358 \cdot 97,394 + 913 \cdot 0,894 + 1185 \cdot 0,796 = 36626,5 \text{ кДж/м}^3.$$

7.2.6. Расчет температур горения

Для нахождения по it-диаграмме соответствующих температур горения $t_\alpha^т$ и $t_\alpha^б$ рассчитаем общее и балансовое теплосодержание, используя формулы (21)...(26).

Первоначально определим химическую энтальпию топлива по формуле (21):

$$i_x = \frac{Q_н^р}{V_\alpha} = \frac{36626,5}{12,21} = 2999,7 \text{ кДж/м}^3.$$

www.mahp.ustu.ru

Физическая энтальпия топлива по формуле (22)

$$i_т = \frac{c_т t_т}{V_\alpha} = \frac{1,57 \cdot 20}{12,21} = 2,57 \text{ кДж/м}^3,$$

здесь удельная теплоемкость топлива $c_т$ рассчитана с использованием прил.3:

$$c_т = 0,01 \left(c_{CH_4} \cdot CH_4^{в.г} + c_{C_3H_8} C_3H_8^{в.г} + c_{C_4H_{10}} C_4H_{10}^{в.г} + c_{N_2} N_2^{в.г} \right) =$$

$$= (1,55 \cdot 97,394 + 3,05 \cdot 0,894 + 4,13 \cdot 0,796 + 1,294 \cdot 0,298) \cdot 0,01 =$$

$$= 1,57 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Физическая энтальпия подогретого воздуха по формуле (23)

$$i_в = \frac{c_в t_в L_\alpha}{V_\alpha} = \frac{1,327 \cdot 400 \cdot 11,19}{12,21} = 486,5 \text{ кДж/м}^3,$$

где $c_в = 1,327$ кДж/(м$^3 \cdot$К) взята из прил.3.

Тогда по формуле (25) общая энтальпия продуктов сгорания составит

$$i_{общ} = i_x + i_т + i_в = 2999,7 + 2,57 + 486,5 = 3488,77 \text{ кДж/м}^3,$$

или после округления $i_{общ} = 3489$ кДж/м^3.

Далее, используя соответствующую it-диаграмму (см. прил.1, рис.1) и вычислив содержание избыточного воздуха в продуктах сгорания по формуле (27)

$$V_L = \frac{L_\alpha - L_0}{V_\alpha} \cdot 100\% = \frac{11,19 - 9,73}{12,21} \cdot 100 = 12\%,$$

найдем теоретическую температуру горения природного газа: $t_\alpha^т = 2030°$С. Затем, найдя по формуле (24) энтальпию химического недожога

$$i_3 = \frac{Q_3}{V_\alpha} = \frac{0,02 \cdot 36626,5}{12,21} = 60 \text{ кДж/м}^3,$$

рассчитаем общее балансовое теплосодержание продуктов сгорания:

$$i_{общ}^б = i_{общ} - i_3 = 3489 - 60 = 3429 \text{ кДж/м}^3.$$

По той же it-диаграмме, но уже по пунктирным кривым, используя то же значение $V_L = 12\%$, найдем балансовую температуру горения: $t_\alpha^б = 2065°$С.

www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

7.3. Расчет процесса горения коксодоменной смеси

В отличие от предыдущего примера расчета в данном случае проведем расчет по приближенным формулам С.Г.Тройба.

7.3.1. Исходные данные

Рассчитать процесс горения смеси доменного и коксового газов с теплотой сгорания $Q_н^р$ = 8400 кДж/м³ (теплота сгорания доменного газа $(Q_н^р)_{дг}$ = 3800 кДж/м³, а теплота сгорания коксового газа $(Q_н^р)_{кг}$ = 17165 кДж/м³). Сжигание осуществляется в атмосфере воздуха с коэффициентом избытка α = 1,2. При этом газовая смесь подогревается до температуры $t_г$ = 250°С, а воздух – до температуры $t_в$ = 400°С. Химический недожог топлива составляет 3% от $Q_н^р$, механический недожог отсутствует.

7.3.2. Расчет количества воздуха для сжигания 1 м³ газовой смеси

Используя формулы (36)...(39) и данные прил.2, рассчитаем теоретическое количество воздуха для сжигания отдельно доменного и коксового газов:

$$(L_0)_{дг} = 0{,}001\cdot 0{,}191\cdot 3800 = 0{,}726 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$(L_0)_{кг} = 0{,}001\cdot 0{,}2567\cdot 17165 - 0{,}25 = 4{,}156 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Применив уравнения (40), определим доли доменного и коксового газов в смеси:

$$\left.\begin{aligned} x + y &= 1, \\ x\cdot 3800 + y\cdot 17165 &= 8400 \end{aligned}\right\}$$

$x = 1 - y$; $(1-y)3800 + y\cdot 17165 = 2400$. Решив последнее уравнение, найдем $y = 0{,}344$, $x = 0{,}656$.

Тогда количество воздуха для сжигания 1 м³ газовой смеси

$$(L_0)_{см} = x(L_0)_{дг} + y(L_0)_{кг} = 0{,}656\cdot 0{,}726 + 0{,}344\cdot 4{,}56 = 1{,}91 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Практически необходимое количество воздуха при α = 1,2 составит $(L_\alpha)_{см} = \alpha (L_0)_{см} = 1{,}2\cdot 1{,}91 = 2{,}29$ м³/м³.

7.3.3. Расчет выхода продуктов сгорания

По формуле (37) раздельно для доменного и коксового газов с использованием данных прил.2 рассчитаем

$$(\Delta V)_{дг} = 0{,}97 - 0{,}001\cdot 0{,}0310\cdot 3800 = 0{,}852 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$(\Delta V)_{кг} = 0{,}44 - 0{,}001\cdot(-0{,}01433)\cdot 17165 = 0{,}686 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Далее осредним величину ΔV для смеси газов пропорционально их долям:

$$(\Delta V)_{см} = x(\Delta V)_{дг} + y(\Delta V)_{кг} = 0{,}656\cdot 0{,}852 + 0{,}344\cdot 0{,}686 = 0{,}795 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Тогда теоретический (при α = 1) выход продуктов сгорания составит

$$(V_0)_{см} = (L_0)_{см} + (\Delta V)_{см} = 1{,}91 + 0{,}795 = 2{,}705 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

а практический выход (при α = 1,2)

$$(V_\alpha)_{см} = (L_\alpha)_{см} + (\Delta V)_{см} = 2{,}29 + 0{,}795 = 3{,}085 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

7.3.4. Расчет температур горения топливной смеси

Определим общее теплосодержание продуктов сгорания, рассчитав предварительно химическую и физическую энтальпию топлива и воздуха:

$$i_х = \frac{(Q_н^р)_{см}}{(V_\alpha)_{см}} = \frac{8400}{3{,}085} = 2723 \text{ кДж/м}^3;$$

$$i_т = \frac{c_т t_т}{(V_\alpha)_{см}} = \frac{1{,}39\cdot 250}{3{,}085} = 112{,}6 \text{ кДж/м}^3,$$

где $c_т$ рассчитана с использованием данных прил.4.

$$c_т = x c_{дг} + y c_{кг} = 0{,}656\cdot 1{,}36 + 0{,}344\cdot 1{,}45 = 1{,}39 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}.$$

Физическая энтальпия подогретого воздуха

$$i_в = \frac{c_в t_в (L_\alpha)_{см}}{(V_\alpha)_{см}} = \frac{1{,}327\cdot 400\cdot 2{,}29}{3{,}085} = 394 \text{ кДж/м}^3.$$

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

Тогда

$$i_{общ} = i_x + i_т + i_в = 2723 + 112,6 + 394 = 3229,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Избыток воздуха в продуктах сгорания в данном случае составит

$$V_L = \frac{L_\alpha - L_0}{V_\alpha} \cdot 100\% = \frac{2,29 - 1,91}{3,085} \cdot 100 = 12,3\%.$$

По соответствующей it -диаграмме (прил.1, рис.2) найдем $t_\alpha^т = 1910^\circ C$.

Энтальпия химического недожога в данном случае составляет

$$i_з = \frac{0,03 (Q_н^р)_{см}}{(V_\alpha)_{см}} = \frac{0,03 \cdot 8400}{3,085} = 82 \text{ кДж/м}^3.$$

Тогда энтальпия $i_{общ}^б$

$$i_{общ}^б = i_{общ} - i_з = 3229,6 - 82 = 3147,6 \text{ кДж/м}^3,$$

а балансовая температура горения по той же it -диаграмме $t_\alpha^б = 1885^\circ C$.

При выполнении данного задания по расчету горения топлива объем задания устанавливается преподавателем, ведущим занятия. Каждый студент выполняет свой вариант задания, назначенный преподавателем. Все необходимые для расчета исходные данные для каждого варианта представлены в прил.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Я.М.Гордон, Б.Ф.Зобнин, М.Д.Казяев и др. М.: Металлургия, 1993. 368 с.

2. Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Металлургия, 1975. 368 с.

3. Тройб С.Г. Расчет температуры горения. Свердловск: УПИ, 1960. 36 с.

4. Советкин В.Л., Федяева Л.А. Теплофизические свойства веществ. Свердловск: УПИ, 1990. 104 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

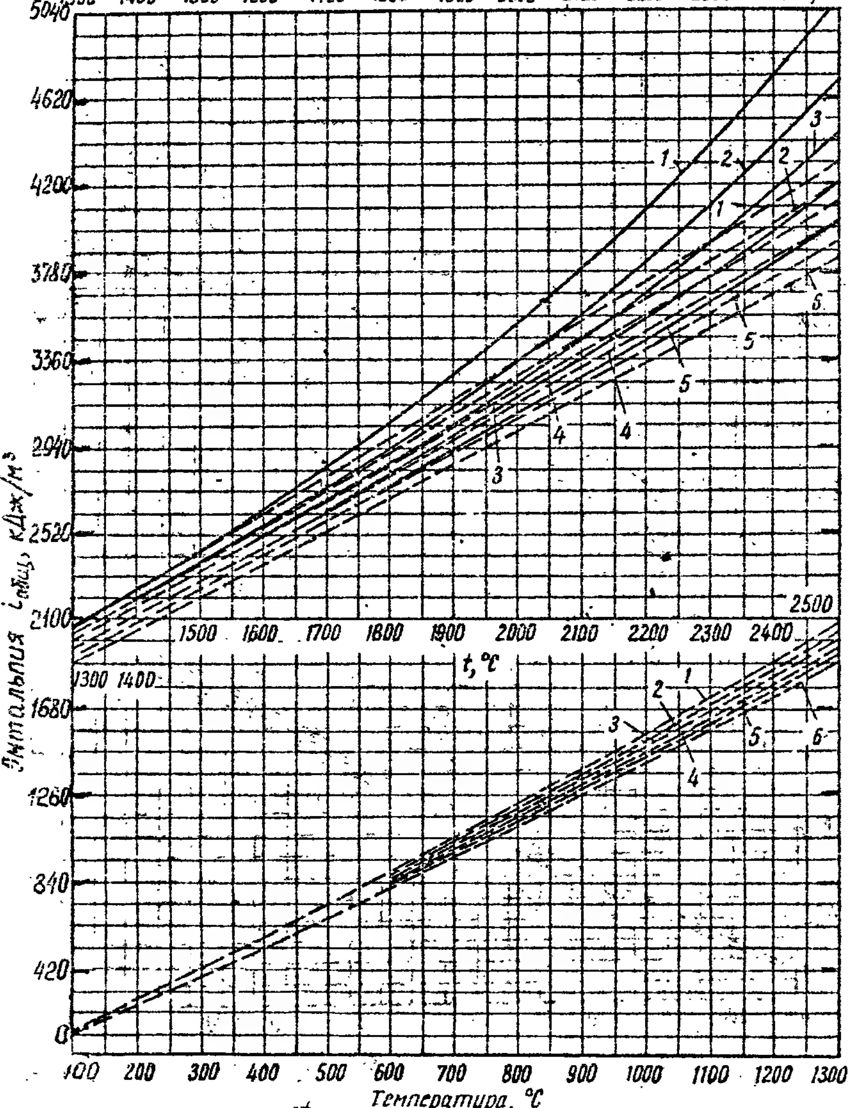


Рис. П.1. it -диаграмма (газы: природный, коксовый и смеси последнего с доменным газом при $Q_н > 12500$ кДж/м³ (3000 ккал/м³), %:
1 – V_L = 0 (продукты сгорания без воздуха); 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100 (чистый воздух); ——— $t_\alpha^т$; – – – $t_\alpha^б$

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

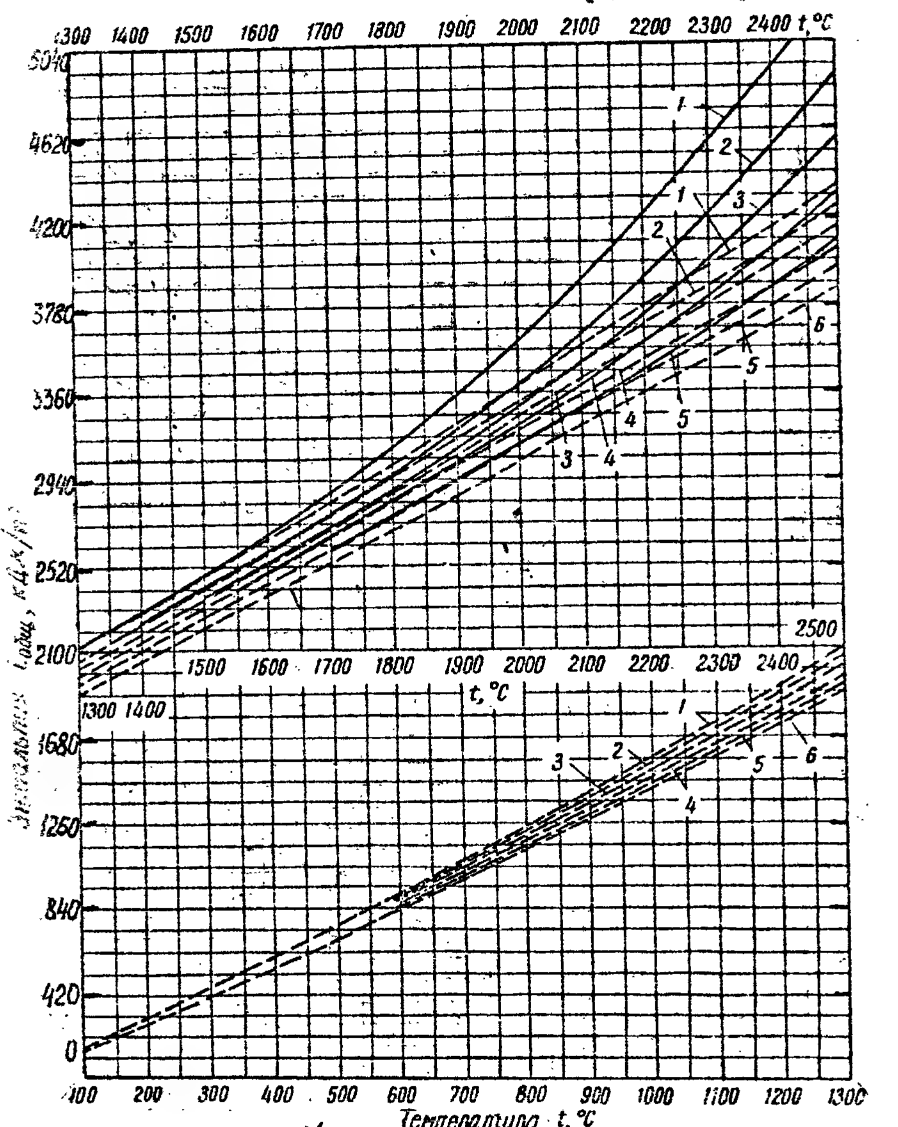


Рис. П.2. it - диаграмма (паровоздушный газ, смесь доменного и коксового газов при $Q_н$ = 8400...125000 кДж/м³ (2000...3000 ккал/м³), мазут, каменные угли, антрацит и кокс), %: I - V_L = 0 (продукты сгорания без воздуха); 2 - 20; 3 - 40; 4 - 60; 5 - 80; 6 - 100 (чистый воздух); ———— $t_\alpha^т$; - - - - $t_\alpha^б$

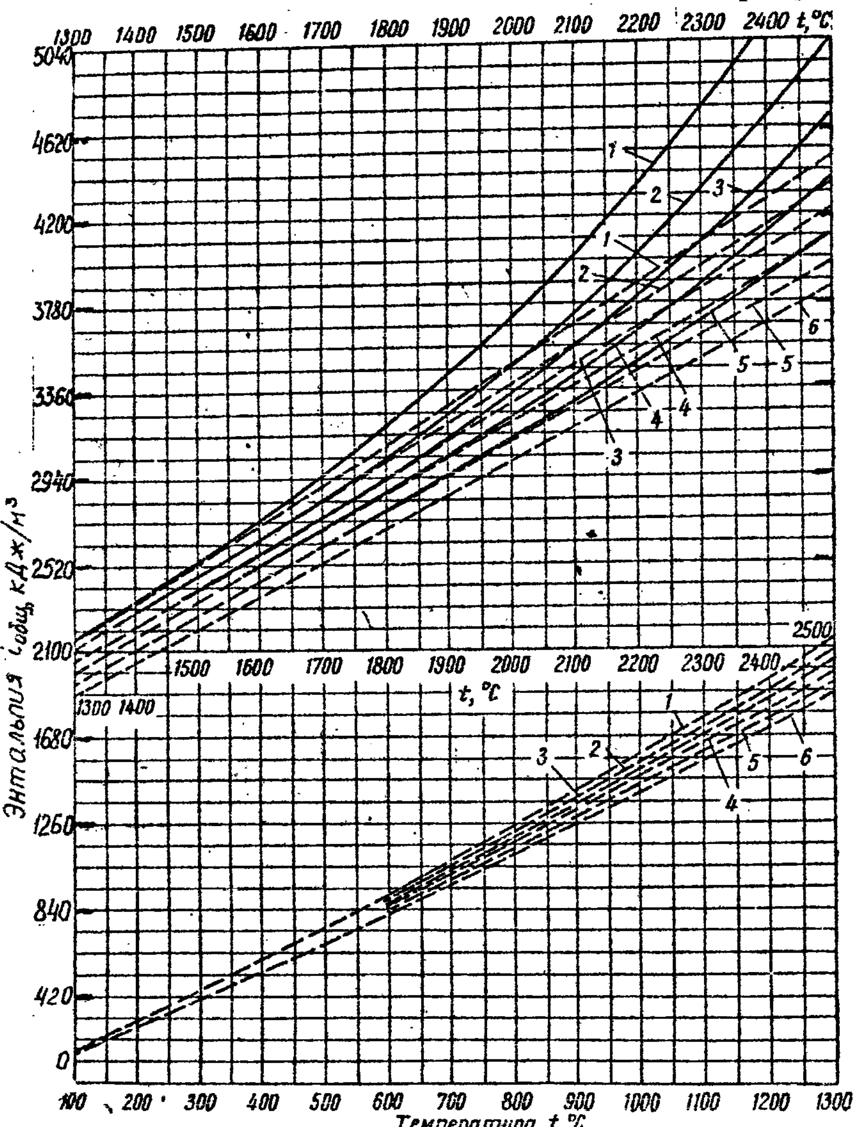


Рис. П.3. it - диаграмма (водяной генераторный газ, смесь доменного и коксового газов при $Q_н$<8400 кДж/м³ (2000 ккал/м³), бурые угли, горючие сланцы, торф и дрова), %: I - V_L = 0 (продукты сгорания без воздуха); 2 - 20; 3 - 40; 4 - 60; 5 - 80; 6 - 100 (чистый воздух); ———— $t_\alpha^т$; - - - - $t_\alpha^б$

www.mahp.ustu.ru

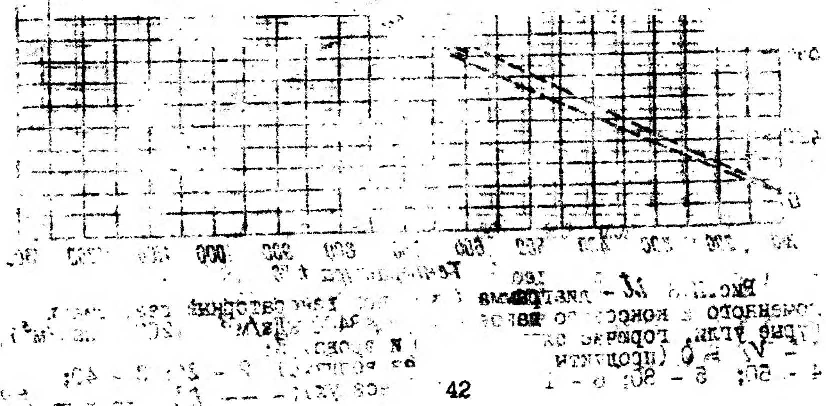
www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств" УГТУ-УПИ

Приложение 2

Значения коэффициента и поправок для расчета характеристик горения топлив приближенным методом

Топливо	l_1	l_2	ΔL	S_1	S_2	W_{rp}
Кокс	0,2627	0,007	0	0,40	0,0086	12,0
Бурые угли:						
$A^c < 20\%$				1,02	0,02627	W^p
$A^c = 20–30\%$	0,2627	0,007	0,06	0,97	0,02627	W^p
$A^c > 30\%$				0,40	0,00860	8,0
Каменные угли:						
$A^c < 20\%$				1,15	0,02866	W^p
$A^c = 20–30\%$	0,2627	0,007	0,06	0,97	0,02627	W^p
$A^c > 30\%$				0,40	0,0086	0
Антрацит	0,2627	0,007	0	0,40	0,0086	0
Мазут	0,2627	0,007	0,06	–0,48	–0,02866	2,0
Доменный газ	0,191	0	0	0,97	0,0310	W^p
Коксовый газ:						
$Q_н^p > 16750$ кДж/м³	0,2567	0	0,25	0,44	–0,01433	W^p
$Q_н^p < 16750$ кДж/м³	0,2567	0	0,25	1,08	0,02388	W^p
Природный газ:						
$Q_н^p < 35800$ кДж/м³	0,2640	0	0,05	1,0	0	W^p
$Q_н^p > 35800$ кДж/м³	0,2640	0	0	0,38	–0,01791	W^p



Приложение 3

Средняя теплоемкость газов, кДж/(м³·К)

t, °C	CO	H_2	N_2	O_2	CO_2	SO_2	H_2S	H_2O	Воздух	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}
0	1,298	1,277	1,294	1,306	1,599	1,733	1,507	1,495	1,298	1,549	1,825	2,211	3,048	4,128	5,127
100	1,302	1,289	1,298	1,319	1,700	1,813	1,532	1,507	1,302	1,641	2,064	2,495	3,510	4,705	5,835
200	1,306	1,298	1,298	1,336	1,788	1,888	1,562	1,524	1,306	1,758	2,282	2,776	3,965	5,256	6,515
300	1,315	1,298	1,306	1,357	1,863	1,955	1,595	1,541	1,315	1,888	2,495	3,044	4,369	5,772	7,135
400	1,327	1,302	1,315	1,377	1,930	2,018	1,633	1,566	1,327	2,014	2,688	3,308	4,760	6,267	7,741
500	1,344	1,306	1,327	1,398	1,989	2,060	1,671	1,591	1,344	2,139	2,864	3,555	5,094	6,689	8,256
600	1,357	1,310	1,340	1,415	2,043	2,114	1,746	1,616	1,357	2,261	3,027	3,776	5,432	7,115	8,783
700	1,373	1,315	1,352	1,436	2,089	2,152	1,780	1,641	1,369	2,378	3,178	3,986	5,724	7,485	9,231
800	1,386	1,319	1,365	1,449	2,098	2,181	1,784	1,666	1,382	2,504	3,308	4,174	5,989	7,808	9,625
900	1,398	1,323	1,377	1,465	2,169	2,215	1,817	1,696	1,398	2,600	3,433	4,363	6,231	8,114	9,992
1000	1,411	1,331	1,390	1,478	2,202	2,236	1,851	1,725	1,411	2,700	3,546	4,530	6,461	8,404	10,345
1100	1,424	1,336	1,403	1,491	2,236	2,261	1,884	1,750	1,424	2,788	3,655	4,685	6,678	8,679	10,679
1200	1,436	1,344	1,415	1,503	2,265	2,278	1,909	1,775	1,432	2,864	3,751	4,827	6,881	8,938	10,997
1300	1,449	1,352	1,424	1,511	2,290	2,299	–	1,805	1,444	2,889	–	–	–	–	–

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Электронная библиотека [redacted]"М[redacted] и а[redacted]параты [redacted] УГТУ-УПИ

Приложение 4

Средняя теплоемкость газообразных топлив, кДж/(м³· К)

Температура	Природный	Коксовый	Доменный
0	I,55	I,35	I,33
I00	I,64	I,39	I,34
200	I,76	I,43	I,35
300	I,90	I,47	I,37
400	2,02	I,5I	I,39
500	2,I4	I,55	I,4I
600	2,27	I,59	I,42
700	2,36	I,63	I,43
800	2,45	I,66	I,45
900	2,56	I,70	I,46
I000	2,66	I,73	I,48
II00	-	I,76	I,49
I200	-	I,79	I,50
I300	-	I,8I	I,5I

Приложение 5

Химический состав топлив и условия его сжигания
(Варианты домашнего задания по расчету горения топлива)

Вариант	Содержание элементов, мас.%							α	$t_т$, °C	$t_в$, °C	$g^{с.б}$, г/м³ с.в.
	C^p	H^p	O^p	N^p	S^p	A^p	W^p				
Т о р ф											
I	49,I	6,I	6,5	0,8	0,I	6,2	3I,2	I,5I	-	235	9,8
2	50,4	5,9	6,8	0,9	0,I	3,9	32,0	I,46	-	245	I2,I
3	49,7	6,0	5,3	0,7	0,I	8,I	30,I	I,48	-	225	I0,2
К а м е н н ы й у г о л ь											
4	79,3	5,2	I,0	0,8	0,5	8,6	4,6	I,50	-	2I0	I3,3
5	83,9	3,8	0,9	I,2	0,8	5,6	3,8	I,47	-	240	I4,5
6	8I,7	4,I	I,2	I,I	0,7	7,7	3,5	I,49	-	2I5	I5,8
7	79,8	5,0	0,8	I,3	0,6	8,4	4,I	I,45	-	225	I3,8
8	83,2	4,5	I,3	I,0	0,5	6,7	2,8	I,5I	-	205	I2,9
9	82,4	4,9	I,I	0,9	0,7	6,9	3,I	I,44	-	230	I4,I
К о к с											
I0	9I,8	I,3	I,I	I,3	I,I	0,4	3,0	I,46	-	240	I5,2
II	85,I	0,6	0,8	0,9	0,6	0,2	I,8	I,48	-	220	I3,9
I2	93,6	I,0	0,9	I,I	0,7	0,3	2,4	I,52	-	205	I6,0
М а з у т											
I3	85,I	9,9	0,2	0,5	0,3	0,I	3,9	I,25	98	280	I3,0
I4	88,0	8,5	0,4	0,3	0,5	0,3	2,0	I,30	95	290	I4,0
I5	84,7	I0,6	0,5	0,4	0,7	0,2	3,6	I,38	I00	295	I5,I
I6	86,2	9,7	0,3	0,5	0,4	0,I	2,8	I,26	90	300	I4,7
I7	87,0	8,6	0,2	0,3	0,6	0,3	3,0	I,37	I00	280	I3,2
I8	84,6	I0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	3,4	I,34	95	285	I3,9
I9	87,6	8,3	0,5	0,4	0,5	0,I	2,6	I,27	98	295	I5,3
20	86,9	9,2	0,3	0,3	0,7	0,3	2,3	I,32	97	290	I5,4
2I	85,5	I0,3	0,2	0,4	0,5	0,2	2,9	I,29	I00	280	I3,4
22	87,9	8,0	0,4	0,5	0,6	0,I	2,5	I,36	96	285	I4,2

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

Продолжение прил. 5

Ва-риант	Содержание, об. %								α	$t_т$, °C	$t_в$, °C	$g^{сг}$ г/м³ с.г
	$H_2S^{сг}$	$CO_2^{сг}$	$CH_4^{сг}$	$C_2H_6^{сг}$	$C_3H_8^{сг}$	$C_4H_{10}^{сг}$	$C_5H_{12}^{сг}$	$N_2^{сг}$				
45	–	0,3	88,0	I,9	0,2	0,3	–	9,3	I,2	200	200	5,0
46	I,0	0,2	76,7	4,5	I,7	0,8	0,6	I4,5	I,3	I00	800	5,0
47	–	–	92,2	0,8	–	0,I	–	6,9	I,2	20	500	5,0
48	–	0,2	94,0	I,2	0,7	0,4	0,2	3,3	I,I5	30	450	5,0
49	–	0,2	97,9	–	–	0,I	–	I,8	I,I	I5	400	5,0
50	–	0,I	97,9	0,5	0,2	0,I	–	I,2	I,I5	25	30	5,0
5I	–	0,I	98,0	0,4	0,2	–	–	I,3	I,05	I50	700	5,0
52	–	0,I	93,5	4,0	I,0	0,5	0,5	0,4	I,I	200	200	5,0
53	–	0,I	95,5	I,0	0,2	0,I	–	3,I	I,2	20	300	5,0
54	2,8	I,0	42,4	I2,0	20,5	7,2	3,I	II,0	I2,5	250	400	5,0
55	–	0,I	97,5	0,6	0,3	0,2	0,2	I,I	I,I	40	350	5,0
56	–	0,I	97,0	0,7	0,2	0,2	–	I,8	I,I5	I50	400	5,0
57	–	0,I	97,2	0,5	0,4	0,4	–	I,4	I,3	200	800	5,0
58	–	–	98,I	–	I,I	0,3	–	0,5	I,05	20	450	6,0
59	–	0,2	97,9	–	I,0	0,4	–	0,5	I,I	40	300	6,0
60	–	0,I	97,2	0,4	0,9	0,6	0,5	0,3	I,2	30	350	6,0

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

I. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТОПЛИВ.. 4

I.I. Химический состав 5

I.2. Теплота сгорания 9

I.3. Отношение топлив к нагреванию без доступа окислителя I0

2. ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ И ЦЕЛЬ ЕГО РАСЧЕТА II

2.I. Цель расчета процесса горения II

2.2. Ограничения и допущения принимаемые в технических расчетах горения топлива I4

3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВ I5

3.I. Определение объема кислорода для окисления горючих элементов топлива I5

3.2. Определение количества воздуха для сжигания I кг топлива I6

3.3. Определение выхода и состава продуктов сгорания. I7

3.4. Расчет температуры горения I9

4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА... 22

4.I. Расчет объема кислорода и воздуха для сжигания I м³ газа 22

4.2. Расчет выхода продуктов сгорания 23

5. ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА 24

6. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ 25

6.I. Расчет характеристик горения смесей газообразных топлив 25

6.2. Расчет характеристик горения смесей газообразных и жидких топлив 26

7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ 27

7.I. Расчет горения жидкого топлива 27

7.2. Расчет процесса горения природного газа 3I

7.3. Расчет процесса горения коксодоменной смеси 36

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 38

ПРИЛОЖЕНИЯ 39

www.mahp.ustu.ru www.htf.ustu.ru/mahp

…ная библиотека кафедры "Машины и аппараты химических производств"

Сергей Николаевич Гущин

Михаил Дмитриевич Казяев

РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ

Редактор издательства – И.Г.Южакова
Технический редактор – Л.П.Лезина
Корректор – О.С.Смирнова

Подписано в печать 06.04.2001 Формат 60×84 1/16
Бумага типографская Офсетная печать
Тираж Заказ Цена "С"

ООО «Издательство УМЦ УПИ»

www.mahp.ru Екатеринбург www.htf.ru/mahp